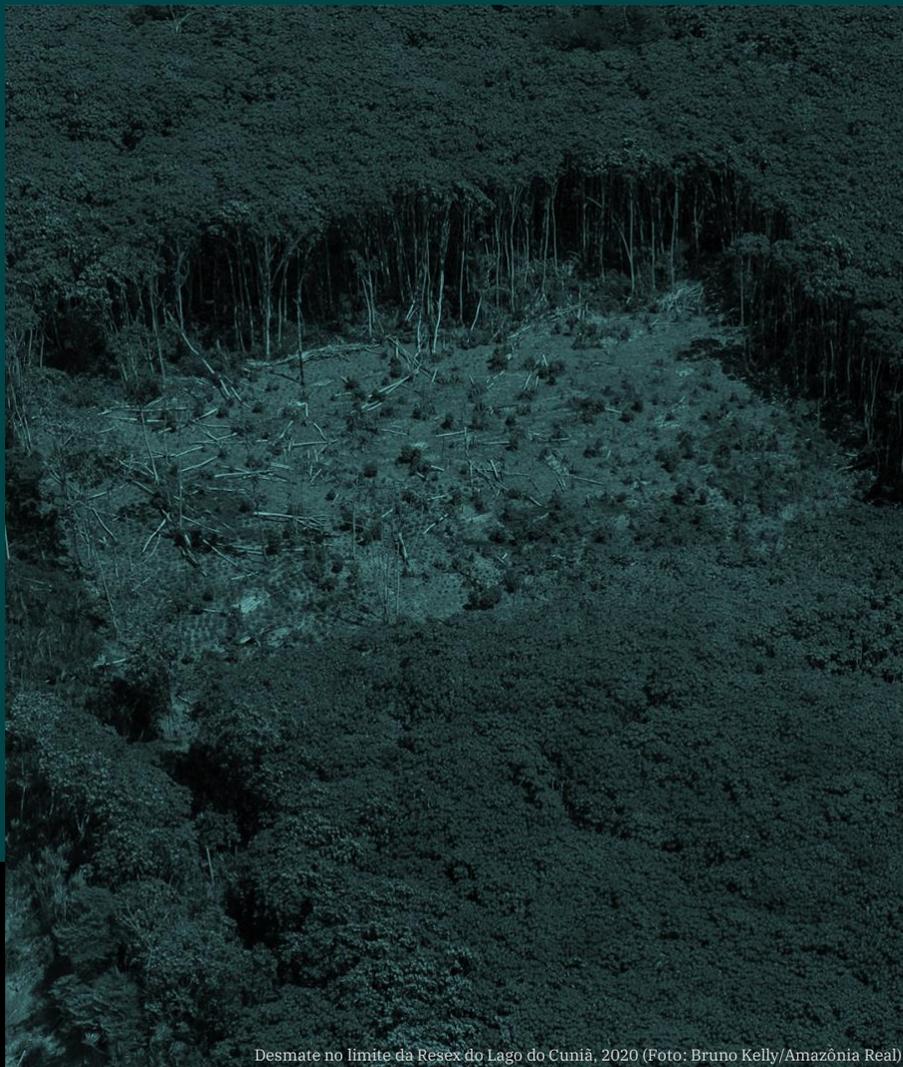


Capítulo 23 em Síntese

Impactos do desmatamento e das mudanças climáticas sobre a biodiversidade, processos ecológicos e adaptação ambiental



Desmate no limite da Resex do Lago do Cuniã, 2020 (Foto: Bruno Kelly/Amazônia Real)



THE AMAZON WE WANT
Science Panel for the Amazon

Impactos do desmatamento e das mudanças climáticas sobre a biodiversidade, processos ecológicos e adaptação ambiental

Paulo Artaxo^a, Vera Almeida-Val^b, Bibiana Bilbao^c, Paulo Brando^d, Mercedes Bustamante^e, Michael T. Coe^f, Sandra Bibiana Correa^g, Francisco Cuesta^h, Marcos Heil Costaⁱ, Fernando Miralles-Wilhelm^j, Norma Salinas^k, Divino Vicente Silvério^l, Adalberto Luis Val^l

Mensagens Principais e Recomendações

- 1) É necessária uma abrangente rede de observatórios ambientais amazônicos e um sistema para compartilhar dados comparáveis para diagnosticar mudanças contínuas.
- 2) A lacuna de conhecimento pertinente ao equilíbrio de carbono (C) é significativo. Sensores remotos de medições de CO₂, dados de fluxo de torres baseadas em solo, medições de aeronaves e ferramentas de modelagem precisam ser integrados para suprir essa lacuna.
- 3) Reduzir as emissões dos biomas é crucial para minimizar impactos negativos sobre os ecossistemas e a saúde humana.
- 4) Mais estudos integrados sobre perda de biodiversidade e mudanças climáticas, por exemplo, sobre resiliência das espécies, são necessários.
- 5) Mais estudos sobre os efeitos das mudanças climáticas sobre o funcionamento do ecossistema amazônico são vitais e devem ser mais bem conhecidos e quantificados, especialmente para carbono e vapor d'água.
- 6) Estudos de equilíbrio da água abrangendo a bacia e que integrem todos os aspectos do ciclo hidrológico, são necessários.
- 7) Estudos paleoclimáticos são essenciais para compreender a variabilidade climática natural e o papel histórico dos humanos ao moldar a paisagem ao longo de várias escalas de tempo.

- 8) São necessários estudos sobre o ecossistema e a resiliência das espécies às temperaturas crescentes e à redução de suprimentos de água.
- 9) Além de reduzir o desmatamento, também é essencial reduzir a queima de combustíveis fósseis, que é a principal causa do aquecimento global.

Resumo Este capítulo apresenta impactos observados e previstos das mudanças climáticas sobre os ecossistemas amazônicos, com foco em biodiversidade, serviços de ecossistemas, ciclos de carbono, pesqueiros e emissões produzidas pela queima de biomassa. Também considera os retornos sobre o clima e o uso da terra, e ressalta as a falta de conhecimento pertinente para melhor compreender essas interações complexas.

Alterações produzidas pelo desmatamento e as mudanças climáticas na biodiversidade e em serviços de ecossistemas A combinação de mudanças climáticas com desmatamento podem causar uma queda de até 58% na riqueza de espécies de árvores até 2050, e as espécies podem perder uma média de 65% de sua área ambientalmente adequada¹. As regiões mais provavelmente afetadas são o leste, sudoeste e sul da Amazônia. A Figura 23.1 ilustra as complexas conexões entre os impactos do clima, do desmatamento, da degrada-

^a Institute of Physics, University of São Paulo, Rua do Matão 1371, CEP 05508-090, São Paulo - State of São Paulo, Brazil, artaxo@if.usp.br

^b Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Av. André Araújo, 2936 - Petrópolis, Manaus - AM, 69067-375, Brazil

^c Universidad Simón Bolívar, Apartado 89000, Caracas 1080, Venezuela

^d Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia, Av. Rômulo Maiorana, 700, Torre Vitta Office, sala 1011, Bairro Marco, Belém - PA, Brazil

^e Department of Ecology, Federal University of Brasília, Brasília, Federal District, 70910-900, Brazil

^f Woodwell Climate Research Center, 149 Woods Hole Road, Falmouth MA 02540-1644, U.S.A.

^g Mississippi State University, 75 B. S. Hood Road, Mississippi State, MS 39762, U.S.A.

^h Universidad de las Americas, De Los Colimes esq, Quito 170513, Ecuador

ⁱ Viçosa Federal University, Av. Peter Henry Rolfs, s/n - Campus Universitário, Viçosa - MG, 36570-900, Brazil

^j University of Maryland, College Park, MD 20742, U.S.A.

^k Pontifical Catholic University of Peru, Av. Universitaria 1801, San Miguel 15088, Peru

^l Universidade Federal Rural da Amazônia, Estr. Principal da Ufra 2150, Curió Utinga, Belém PA, Brazil

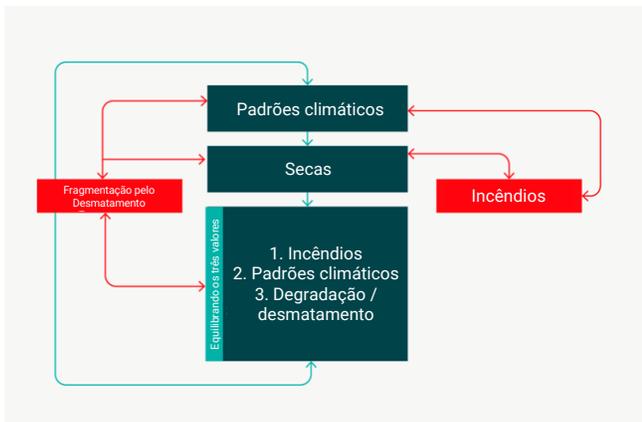


Figura 23.1 Conexões entre os impactos do clima, do desmatamento, da degradação florestal e dos incêndios sobre o ecossistema amazônico

ção florestal e dos incêndios sobre o ecossistema amazônico.

Ao longo dos últimos 30 anos, as comunidades de árvores têm sido cada vez mais dominadas por táxons de grande estatura e gêneros tolerantes à seca². Embora as mudanças climáticas afetem a biodiversidade, a diversidade de traços de vegetais pode permitir que as florestas amazônicas se ajustem às novas condições climáticas, protegendo as funções do ecossistema amazônico³ (ver Capítulo 24). No entanto, nos termos do cenário RCP 8.5 do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC - *Intergovernmental Panel on Climate Change*), a abrupta perturbação de conjuntos ecológicos pode expor simultaneamente a maioria das espécies a climas além de seus limites percebidos de nicho, afetando florestas tropicais até 2050. Pouca variabilidade climática histórica e gradientes termais superficiais significam que muitas espécies na região já estão vivendo próximas aos seus mais altos limites térmicos percebidos ao longo de sua abrangência geográfica. A Amazônia é uma das regiões do mundo sob maior risco, com uma possibilidade de que mais de 90% das espécies sejam expostas a temperaturas sem precedentes até 2100⁴.

A migração em direção a habitats mais úmidos e frios, com os Andes representando um refúgio potencial para muitas espécies, pode resultar em

uma perda líquida de espécies nas florestas de planícies⁵. Contudo, o aumento na riqueza de espécies dos Andes pode causar outras ameaças à biodiversidade, como perda de habitat. Proteger a conectividade das planícies com as terras altas mais frias pode proporcionar uma rota de fuga para muitas espécies.

Biodiversidade aquática, ecossistemas e serviços Os efeitos das mudanças climáticas sobre os peixes amazônicos ainda não são plenamente compreendidos, embora pareçam ser significativos quando expostos a diferentes cenários do IPCC para temperatura, CO₂ e umidade para o ano 2100. Um efeito significativo sobre a função e a biodiversidade dos ecossistemas aquáticos é a disrupção do ciclo hidrológico natural devido aos picos excepcionalmente baixos e altos nos níveis da água durante eventos de extrema seca e inundações⁶ (ver Capítulo 22). Esses eventos podem levar a alterações de tamanho, reprodução, abundância e composição de comunidades de várias espécies, incluindo peixes, aves limícolas e botos⁷.

Muitas espécies de peixes na Amazônia são suscetíveis a pequenos aumentos de temperatura e a temperatura máxima crítica de alguns grupos de peixes já está bem próxima da máxima média⁸. A aceleração do metabolismo de espécies de águas mornas nos habitats das planícies pode provocar maior consumo de alimentos e causar consequências adversas nas redes alimentares locais. As espécies de peixes andino-amazônicas são altamente suscetíveis a contrações em sua faixa de distribuição, o que eventualmente levará à extinção⁹. Além disso, os baixos níveis de água durante períodos de seca extrema podem levar a fragmentação temporária de rios, bloqueio das migrações de peixes e extinções locais¹⁰. Os peixes da Amazônia são adaptados a condições extremas, como baixo pH, variações em oxigênio dissolvido, tipos de água variáveis e carbono orgânico dissolvido, e diferentes pHs. Contudo, ainda estamos longe de compreender como a complexa rede dos recentes impactos antropogênicos irá modificar a biota aquática.

O cálculo das perdas econômicas causadas por reduções da produção de pesqueiros induzidas por mudanças climáticas é um desafio, devido ao escasso conhecimento sobre a produção dos pesqueiros por tipo de habitat¹¹⁻¹³.

A dinâmica das florestas perante um clima em transformação A mudança climática antropogênica está alterando gravemente a dinâmica florestal em toda a bacia, exacerbando motivadores crônicos de mudanças nas florestas e a extensão, frequência e intensidade de eventos isolados e compostos de perturbação, incluindo incêndios, secas, ventanias e ataques bióticos¹⁴. Uma pergunta que se destaca é se essas interações entre estressores e perturbações será grande o bastante para exceder a capacidade das florestas de resistir e responder a tais mudanças, especialmente quando interagem com mudanças no uso da terra e incêndios (ver Capítulo 24).

Embora as florestas tenham desenvolvido resiliência a um certo nível de perturbações, esses novos regimes podem causar uma degradação florestal grave e prolongada, reduzindo a riqueza de espécies florestais e a capacidade de armazenamento de carbono, e causando mudanças significativas na composição de espécies rumo a uma comunidade vegetal mais generalista, menos diversa. As florestas mais suscetíveis a esses distúrbios crescem ao longo das margens mais secas do sul e do oeste da Amazônia, onde a seca, os incêndios e a fragmentação já interagem sinergicamente^{15,16}. As florestas de planícies também são especialmente vulneráveis¹⁷. Apesar da extensa degradação causada pelas interações seca-incêndio na Amazônia, ainda não está claro quanto disso é causado pelas mudanças climáticas em si, dadas as complexas interações envolvendo as mudanças no uso da terra.

Embora as florestas sofrendo distúrbios pelo conjunto de eventos extremos possa vir a se recuperar, o período é incerto. Um único evento perturbador pode matar as espécies mais suscetíveis e selecionar as mais resistentes, o que pode potencialmente reduzir a mortalidade de árvores em eventos

sucessivos. Além disso, mesmo as florestas que sofrem graves distúrbios podem recuperar algumas características pré-distúrbios dentro de décadas¹⁸. No entanto, espera-se que as mudanças climáticas aumentem os riscos de novos distúrbios, sendo que talvez os distúrbios subsequentes impeçam a recuperação. Distúrbios mais frequentes resultariam no empobrecimento crônico da biomassa e biodiversidade, especialmente em paisagens fragmentadas. À medida que o clima regional muda, espera-se que a resiliência da floresta diminua¹⁹. Para melhorar nossa compreensão sobre os impactos potenciais das mudanças climáticas no futuro próximo, será necessário um monitoramento de longo prazo, desde a escala de árvores individuais até o continente inteiro, e a melhoria dos modelos de vegetação global dinâmicos atuais.

Polinização e dispersão de sementes As aves são bons indicadores biológicos dos impactos das mudanças climáticas sobre os serviços ecossistêmicos. Em um estudo de Miranda et al.²⁰, os autores compilaram extensos dados de ocorrência de espécies representativas do sudeste da Amazônia para avaliar o impacto potencial das mudanças climáticas nas assembleias de aves. Eles estimaram que 4-19% das espécies não encontrariam habitat adequado. Dentro das áreas protegidas (APs) atualmente estabelecidas, a perda de espécies pode ser acima de 70%. As frugívoras seriam as mais sensíveis, com consequências para a dispersão de sementes e a regeneração natural. As partes oeste e norte da área de estudo foram consideradas de clima estável.

Costa et al.²¹ descobriram que 57% de 83 espécies de morcegos não encontrariam locais apropriados no Parque Nacional de Carajás (Brasil), dentro dos cenários de mudanças climáticas estudados. Polinizadores, dispersores de sementes e morcegos onívoros seriam potencialmente os mais afetados, sofrendo uma diminuição de 28 a 36% de áreas adequadas dentro da projeção para 2070, afetando as interações vegetais-morcegos. As mudanças climáticas também afetariam a distribuição de abelhas e, conseqüentemente, a polinização de culturas agrícolas. As análises e projeções da distribui-

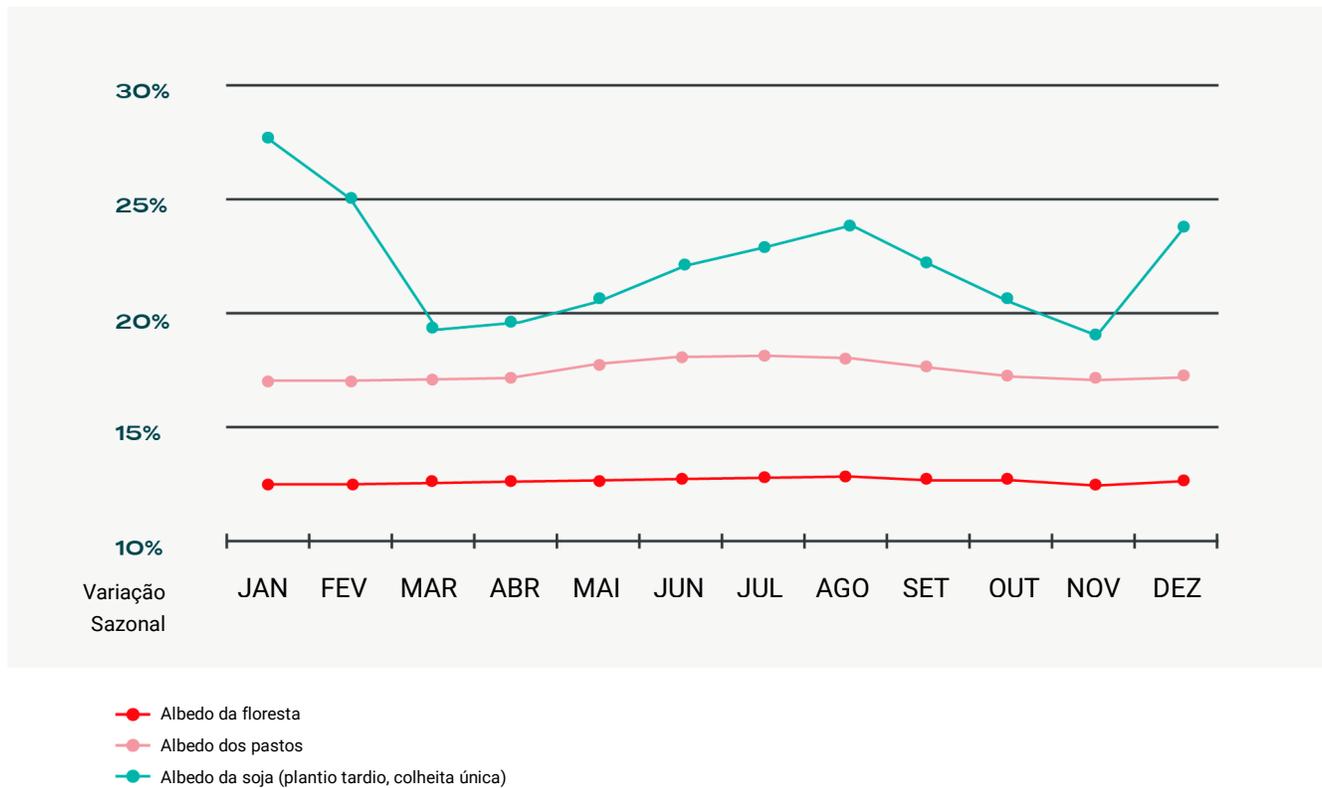


Figura 23.2 Variação sazonal do albedo da floresta, do pasto e da soja. Um aumento substancial do albedo na superfície pode ser observado quando a floresta passa a ser pasto ou cultivo de soja. O albedo aumenta de 13% (floresta) para 17% (pasto).

ção de 216 espécies no Parque Nacional de Carajás mostrou que 95% das espécies de abelhas sofreriam uma diminuição da área total de ocorrência²².

As projeções indicaram também que os polinizadores de nozes perderiam quase 50% de sua distribuição adequada no futuro, levando a uma redução de quase 80% no potencial de co-ocorrência²³ e gerando impactos negativos sobre as economias e bem-estar humanos. Outro estudo examinou a perda de serviços de dispersão de sementes pelos primatas, indicando contrações médias de 56% nas áreas adequadas dos primatas estudados²³.

Retornos sobre as mudanças no clima e no uso da terra Os retornos sobre as mudanças no clima e no uso da terra podem amplificar seus impactos negativos²⁴. Uma questão crucial é se existe uma tendência geral de longo prazo para as condições

de secas e, se houver, a que ponto está associada às emissões de gases de efeito estufa e ao desmatamento. A resposta a essa pergunta requer a análise das causas da variabilidade pluviométrica entre anos e entre décadas.

Ciclo e armazenamento de carbono A variabilidade espacial da absorção e produtividade de carbono das florestas amazônicas está fortemente relacionada aos gradientes climáticos em toda a bacia. Atualmente, cerca de 110 Pg de carbono estão armazenados acima do solo nas florestas amazônicas²⁵, o equivalente a 10 anos de toda a queima global de combustíveis fósseis. As florestas virgens amazônicas retiram carbono da atmosfera em uma taxa de cerca de $50\text{g/m}^2/\text{y}^{-1}$ ²⁶⁻²⁸. Ainda assim, essa taxa diminuiu drasticamente ao longo das últimas duas décadas, devido a reduções no crescimento das árvores e aumentos na mortalidade das árvor-

es, associados à secas^{29,30}, e possivelmente ao aumento de CO₂ atmosférico, promovendo taxas mais altas de renovação florestal³¹. Além disso, muitas árvores amazônicas operam próximas de seu limite bioclimático. Estima-se que o acúmulo de carbono nas florestas amazônicas diminuiu quase 9 MgC/ha para cada aumento de um grau Celsius na temperatura³². As temperaturas extremas durante o dia e as secas são críticas na diminuição da taxa de crescimento das árvores. Como resultado, a capacidade de acumulação de carbono das florestas amazônicas não perturbadas está enfraquecendo, com a possibilidade de que as florestas se tornem fontes globais de carbono em alguns anos^{29,32}. O desmatamento também foi um motivador essencial das reduções de armazenamento de carbono. Em 2019, o desmatamento na Amazônia brasileira liberou cerca de 559 MtCO₂³³. Mais da metade de todas as emissões de CO₂ das nações amazônicas resultam de desmatamento e degradação. As emissões líquidas, somente de 2003 a 2016, foram estimadas em 4,7 Gt CO₂³⁴. As bordas florestais remanescentes tornaram-se muito mais inflamáveis e propensas a queimadas³⁵. Uma vez que as florestas queimam, tendem a ser mais gravemente

perturbadas por ventanias do que as florestas virgens, o que explica porque os estoques de carbono florestal podem cair 90% quando impactados por esses distúrbios³⁶.

Equilíbrio energético e hídrico As florestas tropicais têm um albedo mais baixo, evapotranspiração (ET) mais alta e maior rugosidade do que as áreas agrícolas e pastos que frequentemente as substituem (ver Capítulo 7). Um menor albedo resulta em uma fração significativa de radiação solar sendo absorvida, depositando energia no sistema foliar. Boa parte dessa energia é usada no processo de resfriamento da evapotranspiração, que é geralmente alto o ano todo por causa da luz solar relativamente abundante e da umidade das chuvas ou armazenada no solo. A rugosidade relativamente alta da superfície aumenta a mistura atmosférica de ET e libera energia na troposfera³⁷. Essas condições fornecem umidade atmosférica que aumenta as chuvas, principalmente no início da estação de chuvas³⁸. Em resultado, mais de 60% de todas as chuvas são transpiradas de volta para a atmosfera. Isso tem o efeito imediato de resfriar a superfície da terra em 2-5°C^{39,40}. O desmatamento e a degradação

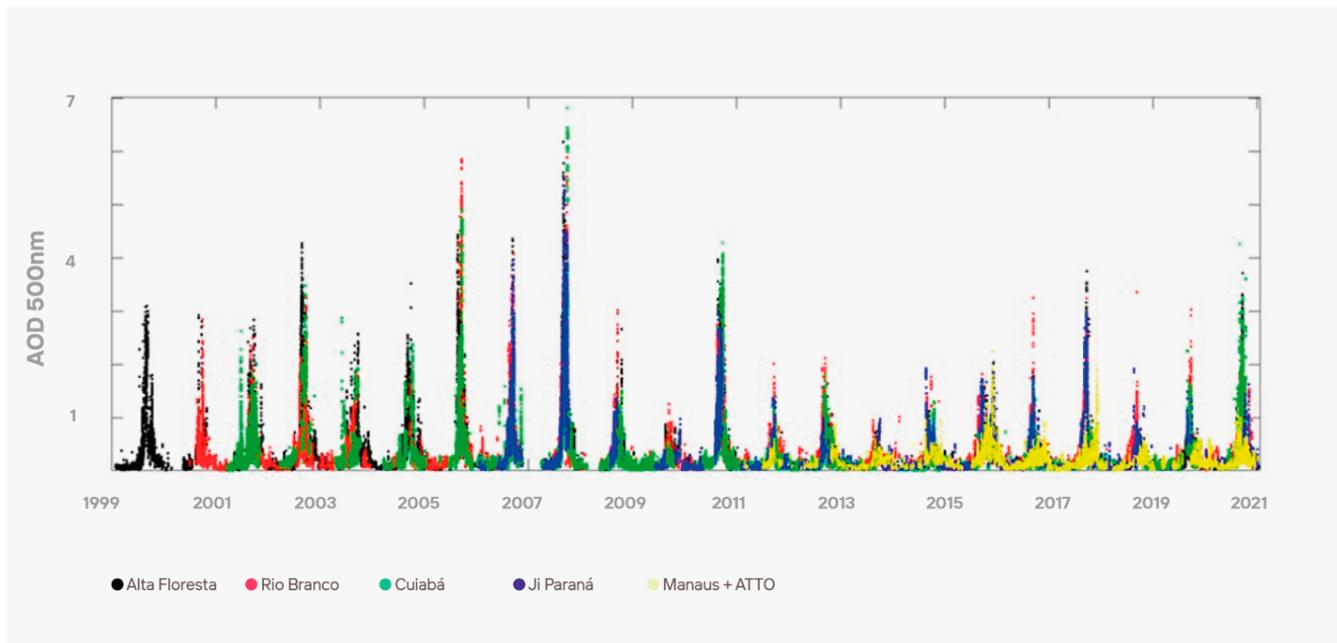


Figure 23.3 Séries temporais (2000-2020) da profundidade óptica dos aerossóis ao longo de cinco locais da Amazônia brasileira. Uma variabilidade significativa ano a ano é motivada pelo clima, bem como pelas políticas públicas que levaram ao desmatamento e emissões provenientes da queima de biomassa.

dação reduzem a evapotranspiração em 30% ou mais, aumentam a temperatura da superfície⁴⁰ e, se suficientemente vastas, reduzem regionalmente o índice pluviométrico⁴¹⁻⁴³. O tipo de uso da terra após o desmatamento tem um impacto menor, mas ainda significativo, com a agricultura tendo um impacto relativamente maior sobre o equilíbrio energético do que os pastos⁴⁰. Apesar dos muitos detalhes variáveis da curva sazonal, o albedo em áreas de cultivo é normalmente muito mais alto que o albedo dos pastos e o da floresta (Figura 23.2).

Em relação às florestas que substituem, os cultivos e as gramas dos pastos têm densidade e profundidade de raízes reduzidas e um índice de área foliar mais baixo. Isso diminui a demanda de água e diminui a evapotranspiração⁴⁴⁻⁵², o que tende a aumentar o escoamento de água. A conversão da vegetação nativa resulta em uma diminuição da ET anual média de cerca de 30%, com reduções muito maiores nas estações secas^{49,53-55}. As mudanças na ET impactam diretamente outras variáveis que influenciam o equilíbrio hídrico superficial; a umidade do solo e o armazenamento de água no solo aumentam em até 30% localmente, enquanto a vazão pode aumentar de 3 a 4 vezes em pequenos riachos de cabeceira e em até 20% em rios muito grandes (por exemplo, Tocantins/Araguaia)⁵⁶⁻⁶⁰. As taxas de evapotranspiração dos cultivos e pastos no sul da Amazônia são equivalentes às das florestas, mas somente durante 2 a 3 meses por ano, no pico da temporada de crescimento⁶¹.

Boa parte da precipitação da Amazônia é resultado da umidade reciclada pela floresta^{62,63} (ver Capítulo 5). Dessa forma, a redução de ET que resulta do desmatamento impacta diretamente a quantidade, localização e ocasião das chuvas. Inúmeros estudos demonstraram uma clara conexão entre o desmatamento e o retardamento do início da estação de chuvas, que também é mais curta (isto é, termina mais cedo)^{41,64,65}. Em estudos de modelagem numérica, Wright et al.³⁸ demonstraram que a evapotranspiração aumenta a umidade em toda a atmosfera durante o final da estação seca, e que isso é crucial para iniciar as chuvas, com o início sendo

adiantado em 2-3 meses em comparação com simulações sem ET florestal. As evidências indicam que a umidade na estação seca da Amazônia está diminuindo, tornando a estação seca mais severa⁶⁶. Em uma análise de dados pluviométricos no sul da Amazônia, Leite-Filho et al.⁴³ estimaram que para cada 1% de aumento no desmatamento, o início da estação chuvosa atrasou em 0,12-0,17 dias, o que representou um atraso de 11 a 18 dias em Rondônia, Brasil⁴¹.

Ainda em relação à evapotranspiração, as emissões de gases de efeito estufa e o desmatamento têm efeitos opostos. O aumento das emissões e o aumento associado da temperatura atmosférica tendem a aumentar a ET, enquanto o desmatamento e a conversão associada das terras à agricultura diminuem a ET. Uma grande quantidade de emissões de carbono provenientes do desmatamento na Amazônia contribui para aumentos dos gases atmosféricos de efeito estufa e da temperatura global, o que espera-se que também deve aumentar a eficiência do uso da água das florestas por meio da fertilização com CO₂ e reduzir a quantidade de vapor d'água reciclado para a atmosfera. Estudos recentes mostraram um aumento do déficit de vapor em toda a Amazônia, mas não se sabe se esta é uma tendência temporária ou permanente, nem como isso afetará a floresta e produzirá retorno em longo prazo. A ET reduzida pode impactar a precipitação, mas as mudanças na resposta ao desmatamento dependem da quantidade e do local onde ocorre o desmatamento. Assim, o impacto do desmatamento e das mudanças climáticas na hidrologia em qualquer local será uma função complexa de fatores concorrentes⁴⁴. A região leste da Amazônia permanece particularmente vulnerável às consequências da contínua conversão do uso da terra para a agricultura⁴⁵. Em resumo, a significativa redução inicial na ET iniciada pelo desmatamento já impactou boa parte da Amazônia, especialmente no sul. Ela tem o potencial, por meio de retorno em grande escala, de alterar o clima da região.

Emissões de aerossóis biogênicos e de incêndios e seus impactos dentro e fora da região A

atmosfera amazônica é dominada por duas estações bem definidas. Na estação chuvosa, a atmosfera é dominada por partículas de aerossóis biogênicos primários naturais emitidos diretamente pela vegetação^{67–69}.

Na estação seca, as emissões provenientes da queima de biomassa mudam substancialmente a composição e as propriedades atmosféricas, impactando o ciclo hidrológico, o equilíbrio de radiação e o funcionamento do ecossistema como um todo^{14,70–72}. Emissões significativas de monóxido de carbono, precursores de ozônio, óxidos de nitrogênio, partículas de aerossóis e outros compostos alteram a composição atmosférica significativamente em grandes áreas da América do Sul, e as partículas podem viajar por milhares de quilômetros^{73–75}. Emissões de carbono negro provenientes da queima de biomassa amazônica alteram o albedo da neve e do gelo, impactando o derretimento das geleiras andinas. Componentes críticos das emissões florestais naturais, como os compostos orgânicos voláteis biogênicos (COVs), estão mudando, possivelmente em associação a temperaturas mais altas⁷⁶. Essas emissões impactam significativamente o ecossistema, incluindo o equilíbrio de radiação, a química atmosférica e a saúde humana^{77–80}. Emissões provenientes de incêndios são calculadas com base na área queimada, através de dados obtidos de sensores remotos e fatores de emissão mensurados em experimentos de campo^{81,82}. Espera-se que a variabilidade climática futura aumente o risco e a gravidade dos incêndios em florestas tropicais. Na Amazônia, a maioria dos incêndios, se não todos, são causados por humanos. Uma forma de avaliar a coluna de aerossol na atmosfera é observar a chamada profundidade óptica do aerossol, que expressa a quantidade total de partículas em toda a coluna de aerossol, conforme mostrado na Figura 23.3.

Conclusões Os impactos das mudanças climáticas e do desmatamento na Amazônia são fortes, diversos e bem documentados. Para onde quer que olhemos, as mudanças climáticas e antropogênicas no uso da terra já causaram impacto substancial nos ecossistemas amazônicos. Além disso, o contrário

também é verdadeiro, com a Amazônia afetando as mudanças climáticas globais, especialmente em termos de emissões de carbono causadas pelo desmatamento. O desmatamento tropical é responsável por cerca de 13% das emissões globais de CO₂⁸³ e Brasil, Colômbia, Bolívia e Peru estão entre os 10 países com maior desmatamento tropical. Reduzir o desmatamento tropical é a maneira mais rápida e barata de mitigar as emissões de gases de efeito estufa, e tem muitos co-benefícios. As mudanças climáticas, em especial os aumentos na temperatura, os extremos climáticos e os ciclos hidrológicos alterados, estão estressando seriamente as florestas tropicais. Reduzir a queima de biomassa é essencial para minimizar vários aspectos negativos associados às altas concentrações de aerossóis, ozônio, monóxido de carbono e óxidos de nitrogênio em grandes áreas da América do Sul. Três efeitos principais das mudanças climáticas nos sistemas aquáticos (marinhos e de água doce) são o aquecimento dos rios e das bacias hidrográficas, a acidificação e a perda de oxigênio. Se considerarmos apenas esses efeitos, podemos prever perda de habitat, mudanças nas migrações dos peixes, perturbações nos agrupamentos de peixes e mudanças na distribuição espacial de espécies de peixes. Espera-se a perda de biodiversidade não apenas pelo desmatamento direto, mas também pelas diferentes sensibilidades de espécies de plantas à temperatura crescente e redução na precipitação. É importante enfatizar que além de reduzir o desmatamento, também é essencial reduzir a queima de combustíveis fósseis, que é a maior causa do aquecimento global.

Referências

1. Gomes, V. H. F., Vieira, I. C. G., Salomão, R. P. & ter Steege, H. Amazonian tree species threatened by deforestation and climate change. *Nat. Clim. Chang.* 9, 547–553 (2019).
2. Esquivel-Muelbert, A. *et al.* Compositional response of Amazon forests to climate change. *Glob. Chang. Biol.* 25, (2019).
3. Sakschewski, B. *et al.* Resilience of Amazon forests emerges from plant trait diversity. *Nat. Clim. Chang.* 6, (2016).
4. Trisos, C. H., Merow, C. & Pigot, A. L. The projected timing of abrupt ecological disruption from climate change. *Nature* 580, 496–501 (2020).
5. Colwell, R. K., Brehm, G., Cardelus, C. L., Gilman, A. C. & Longino, J. T. Global Warming, Elevational Range Shifts, and

- Lowland Biotic Attrition in the Wet Tropics. *Science* (80-.). 322, 258–261 (2008).
6. Marengo, J. A. & Espinoza, J. C. Extreme seasonal droughts and floods in Amazonia: Causes, trends and impacts. *International Journal of Climatology* (2016) doi:10.1002/joc.4420.
 7. Bodmer, R. *et al.* Major shifts in Amazon wildlife populations from recent intensification of floods and drought. *Conserv. Biol.* 32, 333–344 (2018).
 8. Campos, D. F., Val, A. L. & Almeida-Val, V. M. F. The influence of lifestyle and swimming behavior on metabolic rate and thermal tolerance of twelve Amazon forest stream fish species. *J. Therm. Biol.* 72, (2018).
 9. Herrera-R, G. A. *et al.* The combined effects of climate change and river fragmentation on the distribution of Andean Amazon fishes. *Glob. Chang. Biol.* (2020) doi:10.1111/gcb.15285.
 10. Carvalho Freitas, C. E. de *et al.* The Potential Impacts of Global Climatic Changes and Dams on Amazonian Fish and Their Fisheries. in *New Advances and Contributions to Fish Biology* (2012). doi:10.5772/54549.
 11. de França Barros, D. *et al.* Effects of deforestation and other environmental variables on floodplain fish catch in the Amazon. *Fish. Res.* 230, 105643 (2020).
 12. Castello, L. *et al.* Fishery yields vary with land cover on the Amazon River floodplain. *Fish Fish.* 19, 431–440 (2018).
 13. Goulding, M. *et al.* Ecosystem-based management of Amazon fisheries and wetlands. *Fish Fish.* 20, 138–158 (2019).
 14. Davidson, E. A. *et al.* The Amazon basin in transition. *Nature* (2012) doi:10.1038/nature10717.
 15. Morton, D. C., Le Page, Y., DeFries, R., Collatz, G. J. & Hurtt, G. C. Understorey fire frequency and the fate of burned forests in southern Amazonia. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 368, 20120163 (2013).
 16. Alencar, A. A., Brando, P. M., Asner, G. P. & Putz, F. E. Landscape fragmentation, severe drought, and the new Amazon forest fire regime. *Ecol. Appl.* 25, 1493–1505 (2015).
 17. Flores, B. M. *et al.* Floodplains as an Achilles' heel of Amazonian forest resilience. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 114, 4442–4446 (2017).
 18. Chazdon, R. L. *et al.* Carbon sequestration potential of second-growth forest regeneration in the Latin American tropics. *Sci. Adv.* 2, e1501639 (2016).
 19. Schwalm, C. R. *et al.* Global patterns of drought recovery. *Nature* 548, 202–205 (2017).
 20. Costa, M. H., Yanagi, S. N. M., Souza, P. J. O. P., Ribeiro, A. & Rocha, E. J. P. Climate change in Amazonia caused by soybean cropland expansion, as compared to caused by pastureland expansion. *Geophys. Res. Lett.* 34, L07706 (2007).
 21. Miranda, L. S., Imperatriz-Fonseca, V. L. & Giannini, T. C. Climate change impact on ecosystem functions provided by birds in southeastern Amazonia. *PLoS One* 14, e0215229 (2019).
 22. Costa, W. F., Ribeiro, M., Saraiva, A. M., Imperatriz-Fonseca, V. L. & Giannini, T. C. Bat diversity in Carajás National Forest (Eastern Amazon) and potential impacts on ecosystem services under climate change. *Biol. Conserv.* 218, 200–210 (2018).
 23. Giannini, T. C. *et al.* Climate change in the Eastern Amazon: crop-pollinator and occurrence-restricted bees are potentially more affected. *Reg. Environ. Chang.* 20, 9 (2020).
 24. Sales, L. P., Rodrigues, L. & Masiero, R. Climate change drives spatial mismatch and threatens the biotic interactions of the Brazil nut. *Glob. Ecol. Biogeogr.* 30, 117–127 (2021).
 25. Betts, A. K. & Silva Dias, M. A. F. Progress in understanding land-surface-atmosphere coupling from LBA research. *J. Adv. Model. Earth Syst.* 2, (2010).
 26. Artaxo, P., Hansson, H.-C., Andreae, M. & *et al.* Tropical and Boreal Forest – Atmosphere Interactions: A Review. *Tellus-B (In Press)*. (2021).
 27. Ometto, J. P. H. B., Nobre, A. D., Rocha, H. R., Artaxo, P. & Martinelli, L. A. Amazonia and the modern carbon cycle: Lessons learned. *Oecologia* vol. 143 (2005).
 28. Araújo, A. C. Comparative measurements of carbon dioxide fluxes from two nearby towers in a central Amazonian rainforest: The Manaus LBA site. *J. Geophys. Res.* 107, (2002).
 29. Chambers, J. Q., Higuchi, N., Tribuzy, E. S. & Trumbore, S. E. Carbon sink for a century. *Nature* 410, (2001).
 30. Brienen, R. J. W. *et al.* Long-term decline of the Amazon carbon sink. *Nature* 519, 344–348 (2015).
 31. Brando, P. M. *et al.* Droughts, Wildfires, and Forest Carbon Cycling: A Pantropical Synthesis. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* vol. 47 (2019).
 32. McDowell, N. *et al.* Drivers and mechanisms of tree mortality in moist tropical forests. *New Phytologist* vol. 219 (2018).
 33. Hubau, W. *et al.* Asynchronous carbon sink saturation in African and Amazonian tropical forests. *Nature* 579, (2020).
 34. INPE. INPE Emission Model. <http://inpe-em.cst.inpe.br/en/home/> (2021).
 35. Walker, W. S. *et al.* The role of forest conversion, degradation, and disturbance in the carbon dynamics of Amazon indigenous territories and protected areas. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 117, (2020).
 36. Brando, P. M. *et al.* The gathering firestorm in southern Amazonia. *Sci. Adv.* 6, (2020).
 37. Brando, P. M. *et al.* Prolonged tropical forest degradation due to compounding disturbances: Implications for CO₂ and H₂O fluxes. *Glob. Chang. Biol.* 25, (2019).
 38. Panwar, A., Renner, M. & Kleidon, A. Imprints of evaporative conditions and vegetation type in diurnal temperature variations. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 24, 4923–4942 (2020).
 39. Wright, J. S. *et al.* Rainforest-initiated wet season onset over the southern Amazon. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 114, (2017).
 40. Lawrence, D. & Vandecar, K. Effects of tropical deforestation on climate and agriculture. *Nat. Clim. Chang.* 5, 27–36 (2015).
 41. Silvério, D. V. *et al.* Agricultural expansion dominates climate changes in southeastern Amazonia: the overlooked non-GHG forcing. *Environ. Res. Lett.* 10, 104015 (2015).
 42. Butt, N., De Oliveira, P. A. & Costa, M. H. Evidence that deforestation affects the onset of the rainy season in Rondonia, Brazil. *J. Geophys. Res. Atmos.* (2011) doi:10.1029/2010JD015174.
 43. Spracklen, D. V. & Garcia-Carreras, L. The impact of Amazonian deforestation on Amazon basin rainfall. *Geophys.*

- Res. Lett.* 42, (2015).
44. Leite-Filho, A. T., de Sousa Pontes, V. Y. & Costa, M. H. Effects of Deforestation on the Onset of the Rainy Season and the Duration of Dry Spells in Southern Amazonia. *J. Geophys. Res. Atmos.* (2019) doi:10.1029/2018JD029537.
 45. Coe, M. T., Costa, M. H. & Soares-Filho, B. S. The influence of historical and potential future deforestation on the stream flow of the Amazon River – Land surface processes and atmospheric feedbacks. *J. Hydrol.* 369, 165–174 (2009).
 46. Coe, M. T. *et al.* Deforestation and climate feedbacks threaten the ecological integrity of south–southeastern Amazonia. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 368, 20120155 (2013).
 47. Costa, M. H., Botta, A. & Cardille, J. A. Effects of large-scale changes in land cover on the discharge of the Tocantins River, Southeastern Amazonia. *J. Hydrol.* (2003) doi:10.1016/S0022-1694(03)00267-1.
 48. D’Almeida, C. *et al.* The effects of deforestation on the hydrological cycle in Amazonia: a review on scale and resolution. *Int. J. Climatol.* 27, 633–647 (2007).
 49. de Moraes, J. M., Schuler, A. E., Dunne, T., Figueiredo, R. de O. & Victoria, R. L. Water storage and runoff processes in plinthic soils under forest and pasture in eastern Amazonia. *Hydrol. Process.* 20, 2509–2526 (2006).
 50. Lathuillière, M. J., Johnson, M. S. & Donner, S. D. Water use by terrestrial ecosystems: temporal variability in rainforest and agricultural contributions to evapotranspiration in Mato Grosso, Brazil. *Environ. Res. Lett.* 7, 024024 (2012).
 51. Nepstad, D. C. *et al.* The role of deep roots in the hydrological and carbon cycles of Amazonian forests and pastures. *Nature* 372, 666–669 (1994).
 52. Pongratz, J. *et al.* The Impact of Land Cover Change on Surface Energy and Water Balance in Mato Grosso, Brazil. *Earth Interact.* 10, 1–17 (2006).
 53. Scanlon, B. R., Jolly, I., Sophocleous, M. & Zhang, L. Global impacts of conversions from natural to agricultural ecosystems on water resources: Quantity versus quality. *Water Resour. Res.* 43, (2007).
 54. Arantes, A. E., Ferreira, L. G. & Coe, M. T. The seasonal carbon and water balances of the Cerrado environment of Brazil: Past, present, and future influences of land cover and land use. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 117, 66–78 (2016).
 55. Panday, P. K., Coe, M. T., Macedo, M. N., Lefebvre, P. & Castanho, A. D. de A. Deforestation offsets water balance changes due to climate variability in the Xingu River in eastern Amazonia. *J. Hydrol.* 523, 822–829 (2015).
 56. Spera, S. A., Galford, G. L., Coe, M. T., Macedo, M. N. & Mustard, J. F. Land-use change affects water recycling in Brazil’s last agricultural frontier. *Glob. Chang. Biol.* 22, 3405–3413 (2016).
 57. Coe, M. T., Latrubesse, E. M., Ferreira, M. E. & Amsler, M. L. The effects of deforestation and climate variability on the streamflow of the Araguaia River, Brazil. *Biogeochemistry* 105, 119–131 (2011).
 58. Hayhoe, S. J. *et al.* Conversion to soy on the Amazonian agricultural frontier increases streamflow without affecting stormflow dynamics. *Glob. Chang. Biol.* 17, 1821–1833 (2011).
 59. Heerspink, B. P., Kendall, A. D., Coe, M. T. & Hyndman, D. W. Trends in streamflow, evapotranspiration, and groundwater storage across the Amazon Basin linked to changing precipitation and land cover. *J. Hydrol. Reg. Stud.* 32, 100755 (2020).
 60. Levy, M. C., Lopes, A. V., Cohn, A., Larsen, L. G. & Thompson, S. E. Land Use Change Increases Streamflow Across the Arc of Deforestation in Brazil. *Geophys. Res. Lett.* 45, 3520–3530 (2018).
 61. Neill, C. *et al.* Watershed responses to Amazon soya bean cropland expansion and intensification. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 368, 20120425 (2013).
 62. von Randow, R. C. S., von Randow, C., Hutjes, R. W. A., Tomasella, J. & Kruijt, B. Evapotranspiration of deforested areas in central and southwestern Amazonia. *Theor. Appl. Climatol.* 109, 205–220 (2012).
 63. Salati, E. & Vose, P. B. Amazon Basin: A System in Equilibrium. *Science (80-)*. 225, 129–138 (1984).
 64. Maeda, E. E. *et al.* Evapotranspiration seasonality across the Amazon Basin. *Earth Syst. Dyn.* 8, 439–454 (2017).
 65. S. Debortoli, N. *et al.* Rainfall patterns in the Southern Amazon: a chronological perspective (1971–2010). *Clim. Change* 132, 251–264 (2015).
 66. Fu, R. *et al.* Increased dry-season length over southern Amazonia in recent decades and its implication for future climate projection. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 110, 18110–18115 (2013).
 67. Barkhordarian, A., Saatchi, S. S., Behrangi, A., Loikith, P. C. & Mechoso, C. R. A Recent Systematic Increase in Vapor Pressure Deficit over Tropical South America. *Sci. Rep.* 9, 15331 (2019).
 68. Prass, M. *et al.* Bioaerosols in the Amazon rain forest: Temporal variations and vertical profiles of Eukarya, Bacteria and Archaea. *Biogeosciences Discuss.* 1–23 (2021).
 69. Whitehead, J. D. *et al.* Biogenic cloud nuclei in the central Amazon during the transition from wet to dry season. *Atmos. Chem. Phys.* 16, 9727–9743 (2016).
 70. Poschl, U. *et al.* Rainforest Aerosols as Biogenic Nuclei of Clouds and Precipitation in the Amazon. *Science (80-)*. 329, 1513–1516 (2010).
 71. Andreae, M. O. Smoking Rain Clouds over the Amazon. *Science (80-)*. 303, 1337–1342 (2004).
 72. Andreae, M. O. *et al.* Carbon monoxide and related trace gases and aerosols over the Amazon Basin during the wet and dry seasons. *Atmos. Chem. Phys.* 12, 6041–6065 (2012).
 73. Andreae, M. O. *et al.* The Amazon Tall Tower Observatory (ATTO): Overview of pilot measurements on ecosystem ecology, meteorology, trace gases, and aerosols. *Atmos. Chem. Phys.* 15, (2015).
 74. Andreae, M. O. *et al.* Transport of biomass burning smoke to the upper troposphere by deep convection in the equatorial region. *Geophys. Res. Lett.* 28, 951–954 (2001).
 75. Freitas, S. R. *et al.* Monitoring the transport of biomass burning emissions in South America. *Environ. Fluid Mech.* 5, 135–167 (2005).
 76. Reddington, C. L. *et al.* Analysis of particulate emissions from tropical biomass burning using a global aerosol model and long-term surface observations. *Atmos. Chem. Phys.* 16, 11083–11106 (2016).
 77. Yáñez-Serrano, A. M. *et al.* Amazonian biogenic volatile

- organic compounds under global change. *Global Change Biology* vol. 26 (2020).
78. Forster, P. *et al.* Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing. in *Climate Change 2007: The Physical Science Basis* (eds. Solomon, S. D. et al.) (Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007).
79. Artaxo, P. *et al.* Atmospheric aerosols in Amazonia and land use change: from natural biogenic to biomass burning conditions. *Faraday Discuss.* 165, 203 (2013).
80. Bela, M. M. *et al.* Ozone production and transport over the Amazon Basin during the dry-to-wet and wet-to-dry transition seasons. *Atmos. Chem. Phys.* 15, 757–782 (2015).
81. Butt, E. W. *et al.* Large air quality and human health impacts due to Amazon forest and vegetation fires. *Environ. Res. Commun.* 2, (2020).
82. van Marle, M. J. E. *et al.* Fire and deforestation dynamics in Amazonia (1973–2014). *Global Biogeochem. Cycles* 31, (2017).
83. Randerson, J. T., Chen, Y., Van Der Werf, G. R., Rogers, B. M. & Morton, D. C. Global burned area and biomass burning emissions from small fires. *J. Geophys. Res. G Biogeosciences* 117, (2012).
84. GCP. Global Carbon Budget. *The Global Carbon Project* (2020).